

Résumé de cours M2 Microélectronique

Module : Physique des composants semi-conducteurs 3

Prof. Abdelhamid BENHAYA

Directeur du Laboratoire d'Electronique Avancée
Responsable Salle Blanche

Département d'Electronique
Faculté de Technologie
Université Batna 2

Domaines d'intérêt:

Technologie des semi-conducteurs
(Matériaux et dispositifs photovoltaïques)

e-mail: a.benhaya@univ-batna2.dz
benhaya_abdelhamid@yahoo.fr

Tel: +213 (0)7 73 87 37 84



BIBLIOGRAPHIE

Langue Anglaise

1. Marius Grundmann, The Physics of Semiconductors (Chapter 13), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
2. <https://nanohub.org/resources/5346>
3. <https://nanohub.org/courses/FON2>

Langue Française

1. H. MATHIEU, physique des semi-conducteurs et des composants électroniques (Chapitres 10 et 12) , Dunod, 2001.
2. <https://www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/>



Transistor à effet de champ à gaz d'électrons bidimensionnel-TEGFET

HEMT (**H**igh **E**lectron **M**obility **T**ransistor)

TEGFET (**T**wo-dimensional **E**lectron **G**as **F**ield **E**ffect **T**ransistor)

MODFET (**M**Odulation **D**oped **F**ield **E**ffect **T**ransistor)

HFET (**H**eterojunction **F**ield **E**ffect **T**ransistor)

PLAN DE L'EXPOSÉ

Historique

Dénomination

Principe de base

Confinement quantique

Du MESFET au HEMT

Structure du HEMT

Analogie du HEMT avec le MOSFET et le MESFT

Caractéristique $I_{DS}(V_{DS})$

Expression de $n(V_{GS})$ dans les différents régimes

MESFET parasite et ses effets

Avantages et applications du HEMT



TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Historique

1960: Fabrication de petits cristaux à base de GaN;

1979 : L'équipe de Takashi Mimura à Fujitsu au Japon arriva à concevoir les caractéristiques du 1^{er} HEMT (High Electron Mobility Transistor);

1985: Le HEMT s'annonça en tant que le dispositif de bruit le plus bas;

1987: Commercialisation des 1^{er} HEMT pour les récepteurs de radiodiffusion par satellite;

1990: Commercialisation des 1^{ères} versions du HEMT;

1994: Apparition du 1^{er} HEMT à base de AlGaN/GaN;

2010: Large utilisation dans les dispositifs à grande vitesse.

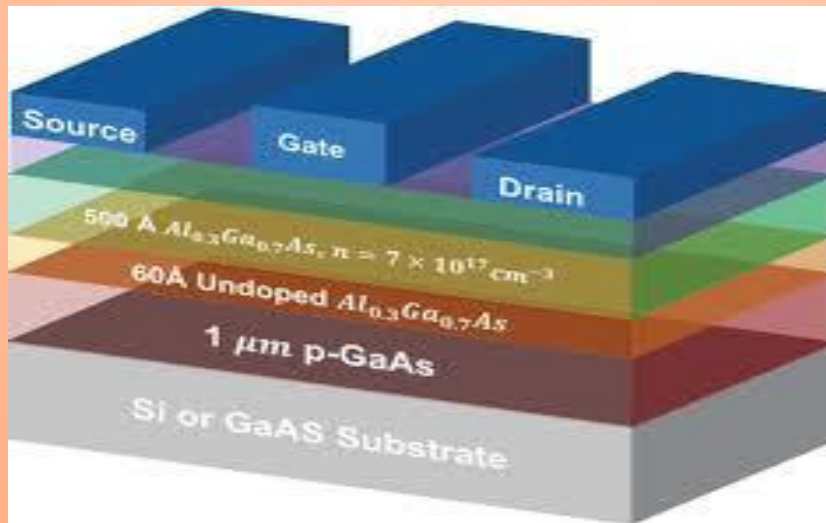


TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Dénominations

Le transistor HEMT a plusieurs dénominations:

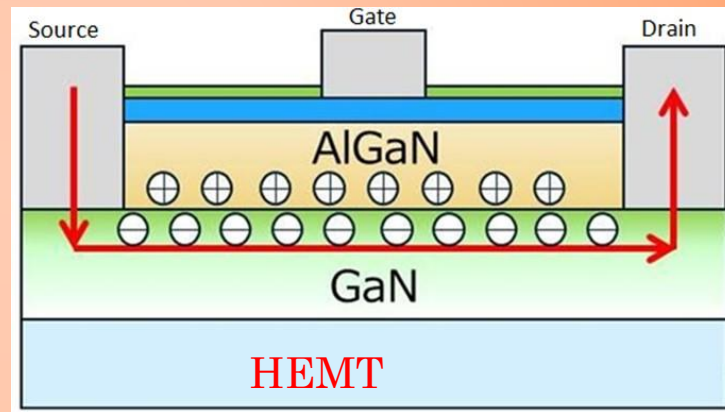
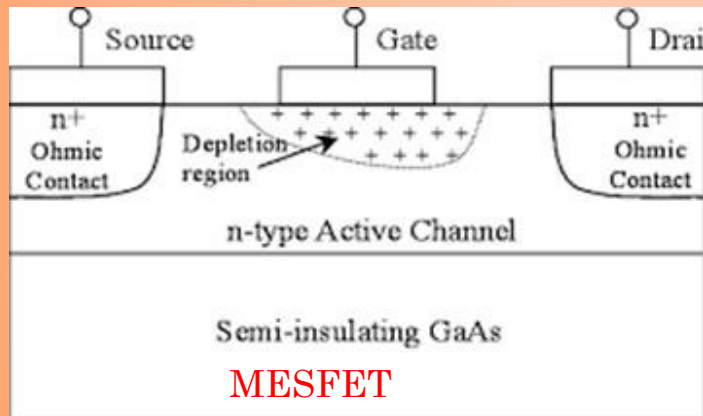
- TEGFET: **T**wo dimensional **E**lectron **G**as **F**ield **E**ffect **T**ransistor;
- MODFET (**M**ODulation **D**oped ;**F**ield **E**ffect **T**ransistor);
- HFET (**H**eterojunction **F**ield **E**ffect **T**ransistor)



TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Evolution: du MESFET au HEMT

Le transport électronique s'effectue au voisinage d'une interface entre un matériau à **grand gap fortement dopé** et un matériau à **petit gap non intentionnellement dopé**.



La présence de cette hétérojonction permet d'obtenir une **importante densité de porteurs** dans le **matériau intrinsèque** où la **mobilité** et les **vitesse**s électroniques sont **plus élevées**



TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Principe de base

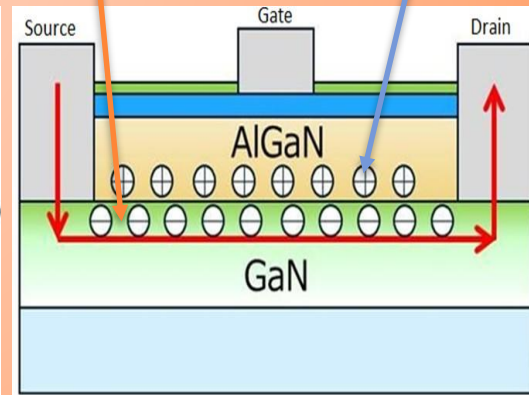
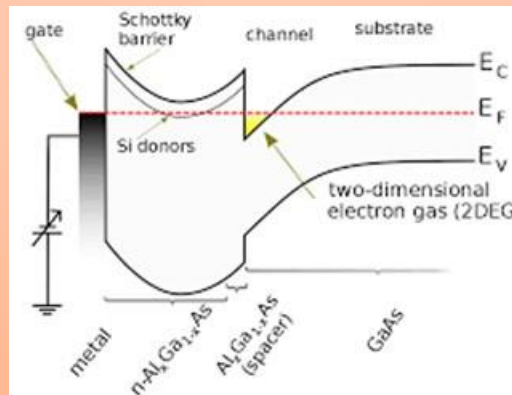
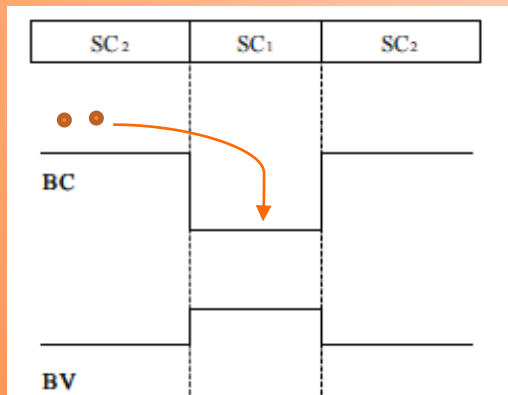
Le principe de base exploité dans le cas des HEMT consiste à tirer profit des propriétés de haute mobilité d'un gaz bidimensionnel d'électrons formé à l'interface d'une hétérojonction.

Objectif à atteindre

Obtenir une grande mobilité en séparant spatialement les électrons libres, des donneurs ionisés dont ils proviennent.

Electrons libres

Donneurs ionisé



TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Confinement quantique

On parle de **confinement quantique** lorsque les **déplacements** des **électrons** ou des **trous** d'un semiconducteur sont **limités** dans **une** ou **plusieurs dimensions**.

Selon que l'on a confinement dans **une**, **deux** ou **trois dimensions**, on a un **puits quantique**, un **fil quantique** ou **une boîte quantique**. On obtient **un régime de confinement quantique** lorsque **la taille du composant** devient très petite, de l'ordre du rayon d'un exciton dans un matériau massif (rayon de l'exciton de Bohr), soit **moins de 20 nm**.

Le **confinement quantique modifie les propriétés électroniques d'un matériau**. Il se manifeste **par l'apparition de niveaux d'énergie discrets**. Il apparaît dans les semiconducteurs et dans les métaux, lorsque les dimensions sont voisines de la longueur d'onde de Fermi qui décroît avec la densité des porteurs de charge. Le confinement quantique apparaît dans **les semiconducteurs vers 200 nm** et dans **les métaux vers 1 nm**.

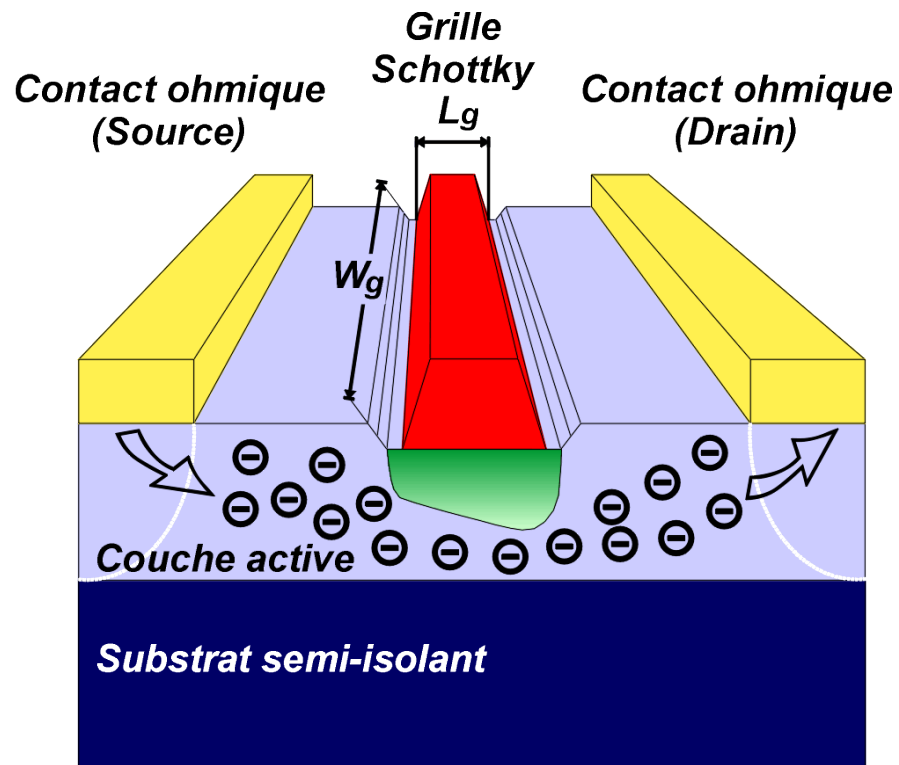


TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Rappel: MESFET

Le principe de fonctionnement du **MESFET** est basé sur la modulation de la conductance entre deux contacts ohmiques appelés "**Source**" et "**Drain**", par l'action électrostatique d'une électrode de commande dénommée "**Grille**"

C'est l'effet d'amplification transistor qui permet de transformer un faible signal appliqué sur la grille en un signal plus fort récupéré sur le drain.



TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Raisons ayant conduits au développement du HEMT

Les FETs conventionnels souffrent des limitations suivantes:

- Effets dus au canal court;
- Courant de fuite de la grille;
- Dissipation de puissance dans la grille;
- Mobilité faible;
- Transconductance faible;
- Effets des impuretés ionisées;
- Diffusion par le réseau et les impuretés.



TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Structure d'un HEMT

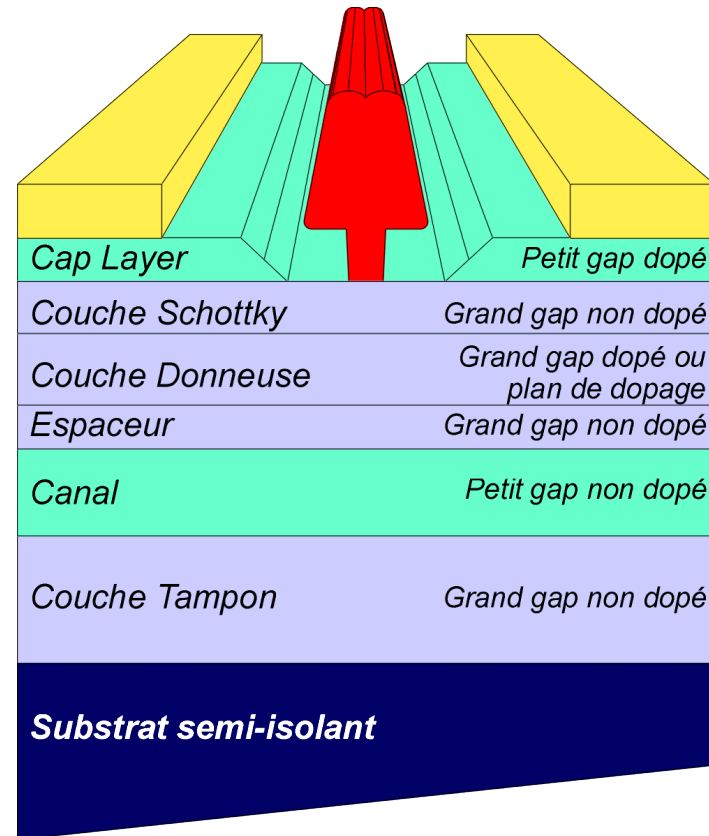
Elle est constituée essentiellement de trois matériaux différents :

- ❑ le substrat;
- ❑ un matériau à grand gap;
- ❑ un matériau à petit gap.

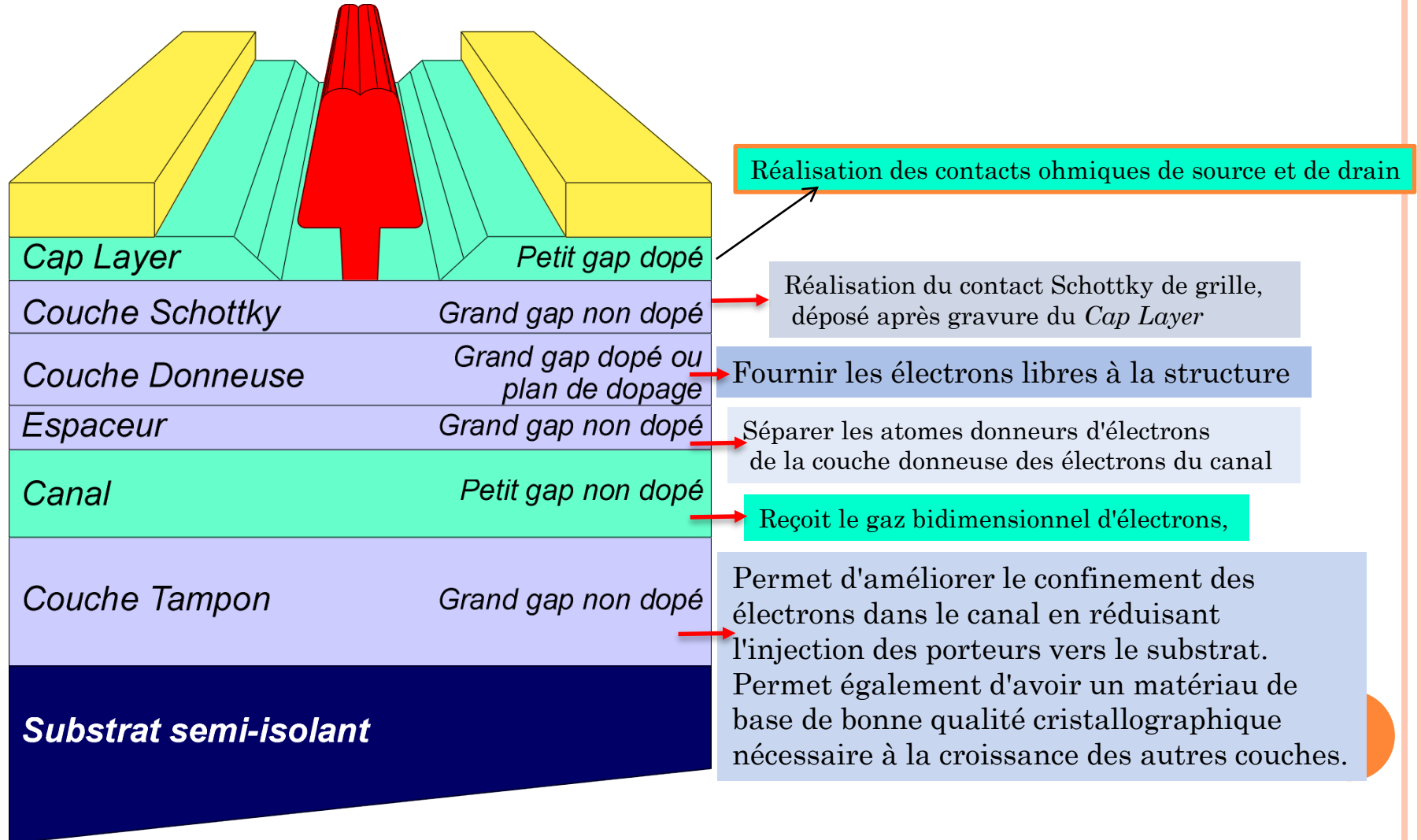
et

les électrodes:

- Source;
- Grille;
- Drain,

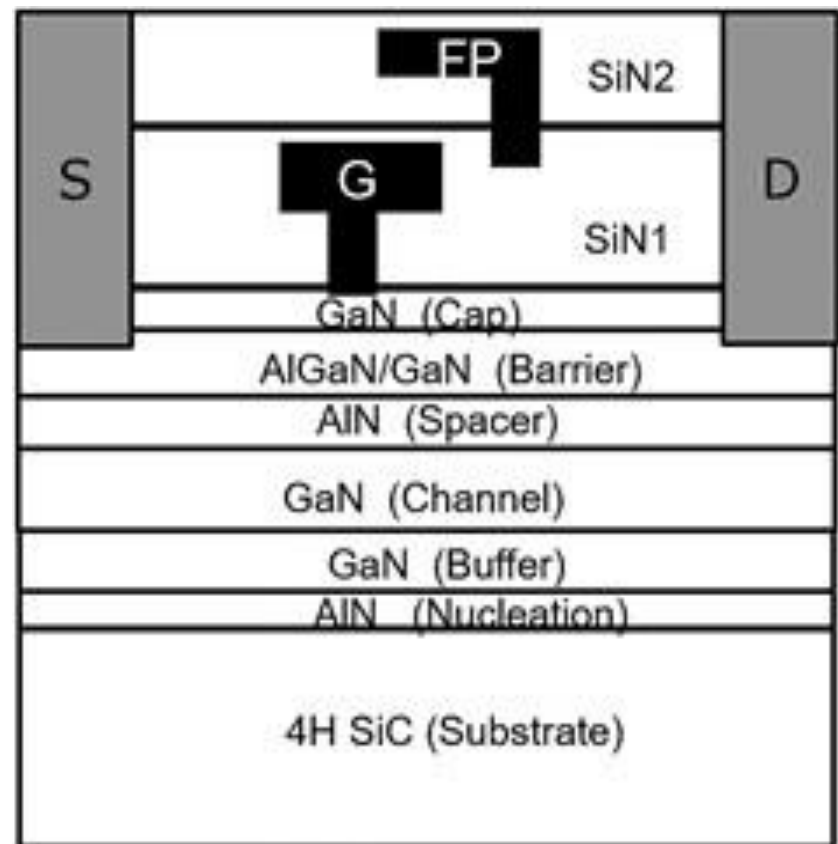


TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

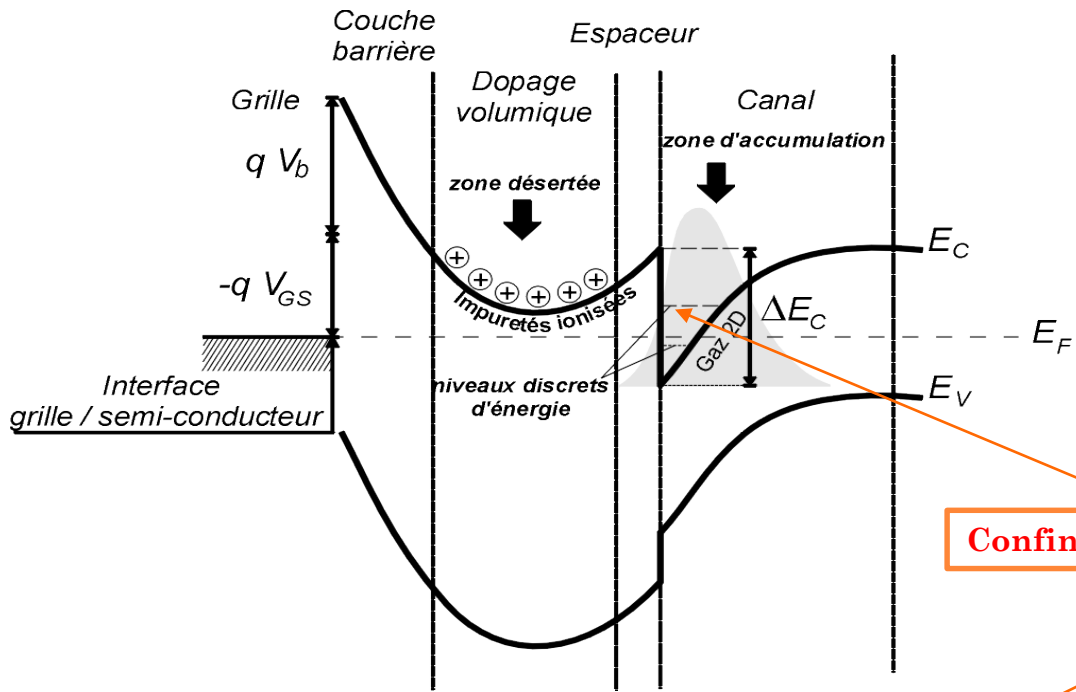


TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

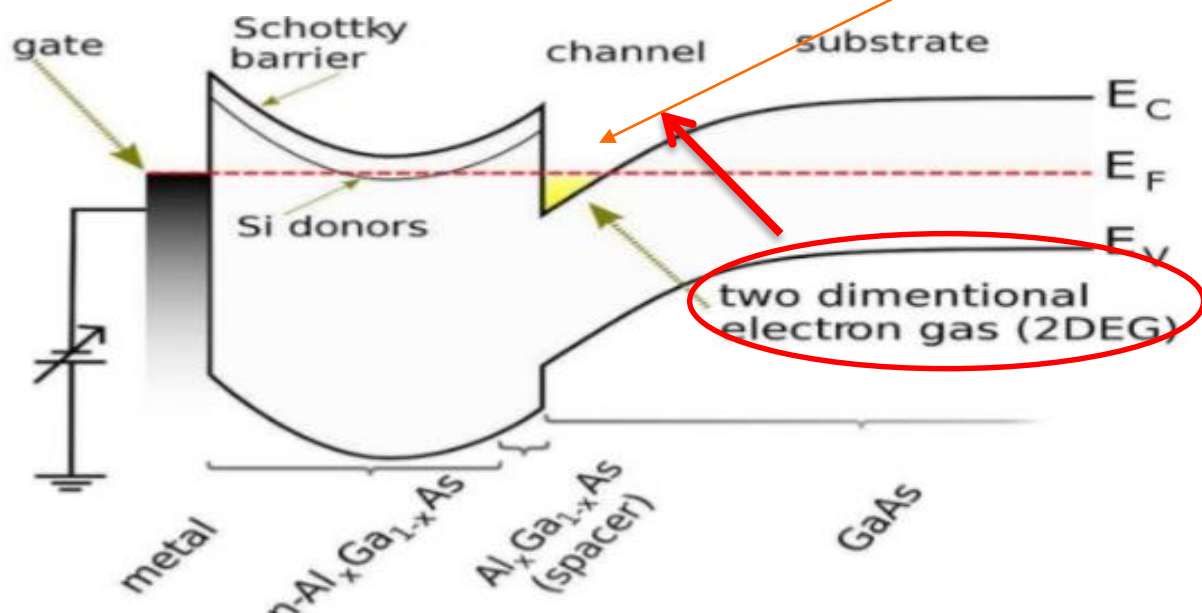
3nm GaN Cap Layer
25nm Al _{0.26} GaN _{0.74} Barrier layer
1nm AlN Inter-layer
2µm GaN
- 1µm Buffer layer
1000µm Si (111) Substrate



Matériaux et ordre de grandeur des dimensions



Confinement des électrons dans un puits



TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

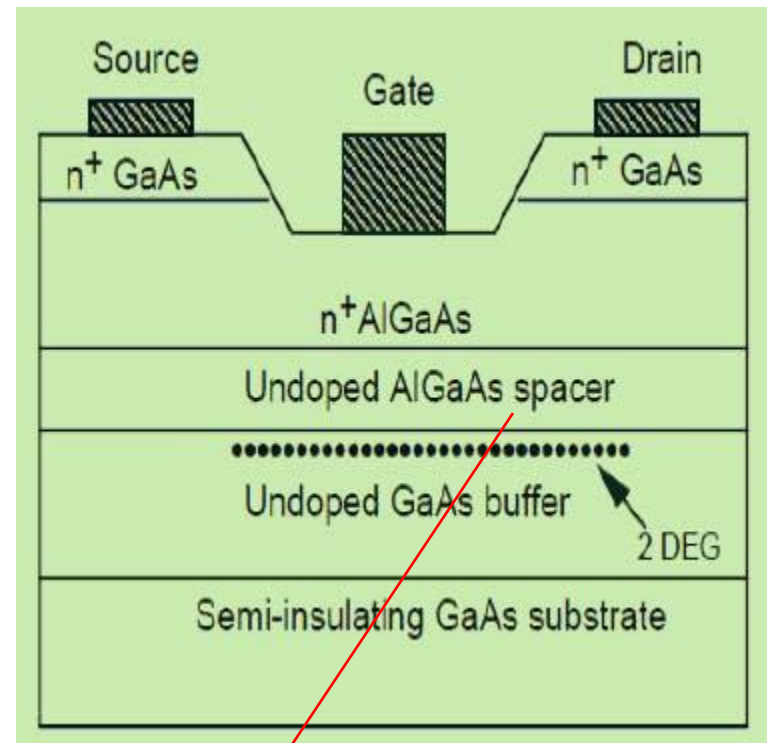
Analogie Structure TEGFET

La structure du **TEGFET GaAs-AlGaAs** peut être comparée à celle du:

❑ **MESFET-GaAs** dans lequel une couche mince de AlGaAs est intercalée entre l'électrode métallique et le GaAs

ou à celle du

❑ **MOSFET-GaAs** dans lequel la couche d'oxyde est remplacée par une couche de AlGaAs.

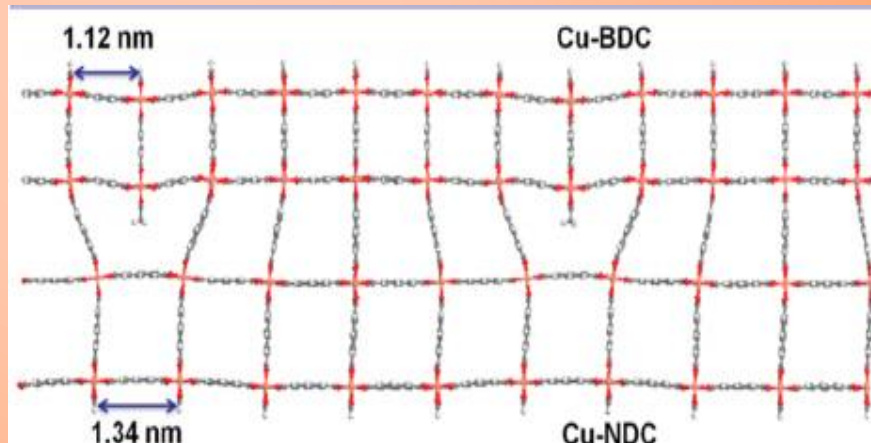
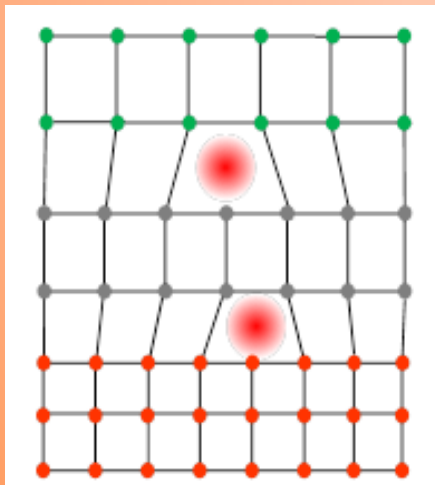


Pour réduire l'effet des donneurs du AlGaAs dopé sur les électrons du canal dans GaAs

TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Exigence de l'hétérojonction

- Deux semi-conducteurs dissemblables avec des bandes interdites différentes;
- Accord de réseau entre les deux semi-conducteurs (structure cristalline et paramètre de maille).



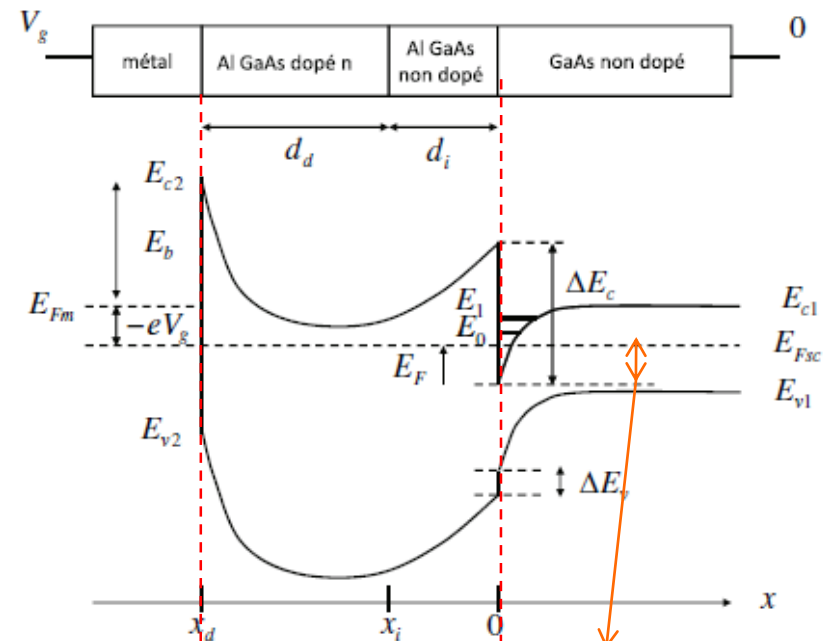
TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Commande de grille

les zones de déplétion de la diode Schottky et de l'hétérojonction se recouvrent.

Nous dirons que le AlGaAs est en déplétion totale. La couche de AlGaAs est alors isolante.

On peut, comme dans une capacité MOS, commander la population n d'électrons de la couche d'inversion de GaAs par la tension de grille V_g .

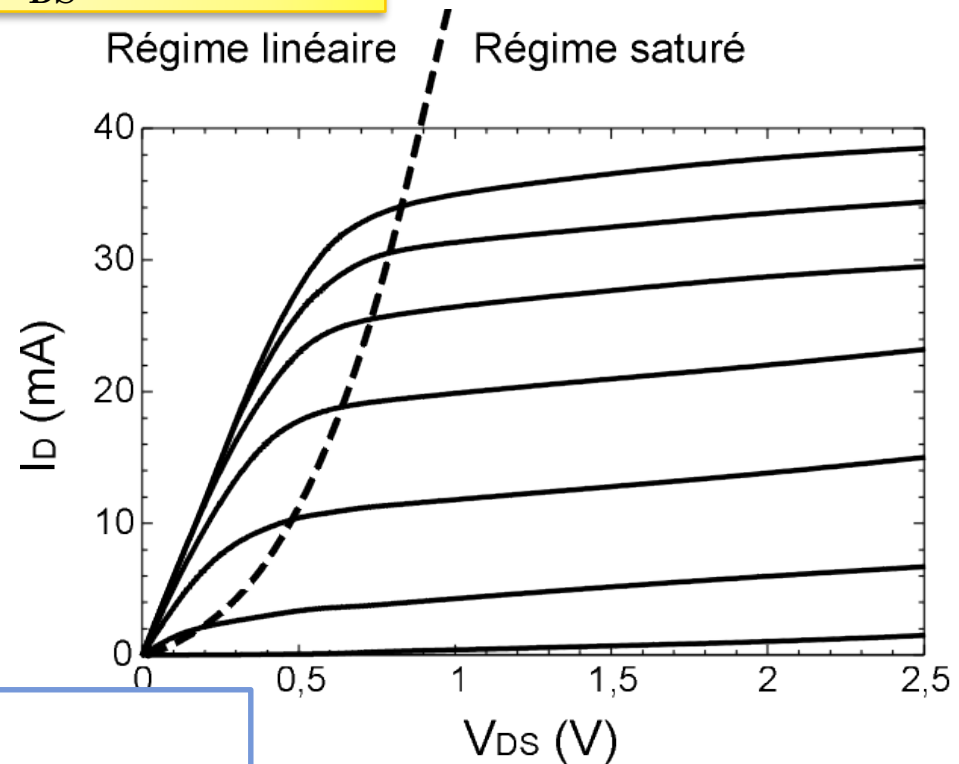
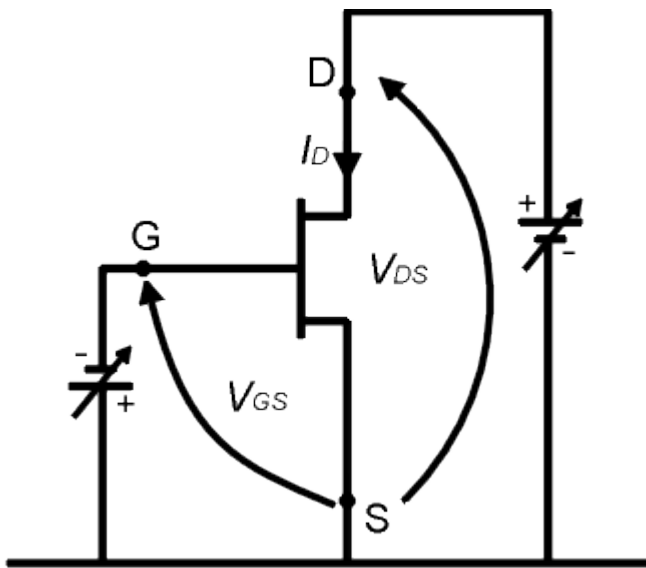


Région en
déplétion
totale

Décalage du à
La polarisation

TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Caractéristiques $I_D(V_{DS})$ des HEMT



Substrat GaAs

$L_g = 0,25 \mu\text{m}$

$W_g = 80 \mu\text{m}$

$V_{GS} = +1 \text{ V}$ à $-0,4 \text{ V}$ avec un pas de $0,2 \text{ V}$



TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

But des calculs

Etablir la relation $n(V_g)$

Etape 1

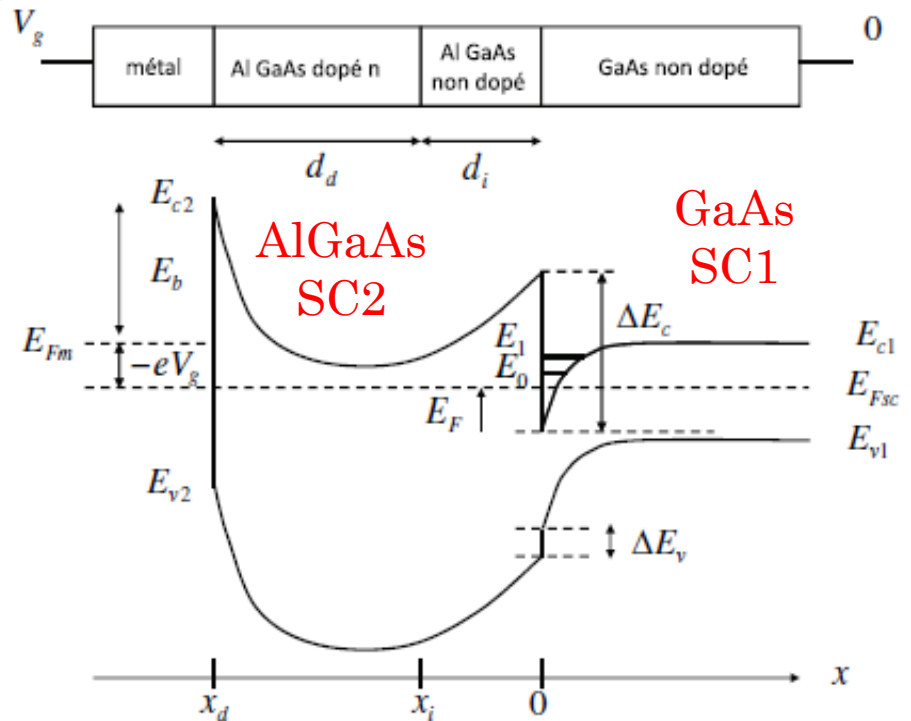
Etablir la relation $n(V_g, E_F)$
en intégrant l'équation de
Poisson dans le AlGaAs;

Etape 2

Etablir la relation $n(E_F)$ dans la
couche d'inversion;

Etape 3

Résoudre le système des deux
équations obtenu pour avoir
 $n(V_g)$.



TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Etape 1: Relation $n(V_g, E_F)$

A partir de la relation de continuité du vecteur déplacement à l'interface AlGaAs-GaAs :

$$\varepsilon_1 E_1(o) = \varepsilon_2 E_2(o)$$

Et des relations :

$$E_1(o) = -\frac{Q_1}{\varepsilon_1} = \frac{en}{\varepsilon_1}$$

$$E_2(o) = \frac{1}{d} \left(V_g - \frac{E_F}{e} - V_t \right)$$

On obtient:

$$n = \frac{\varepsilon_2}{ed} \left(V_g - \frac{E_F}{e} - V_t \right)$$

avec:

$$V_t = \frac{E_b}{e} - \frac{\Delta E_c}{e} - \frac{eN_d}{2\varepsilon_2} d_d^2$$

Remarque: Tension de seuil

On constate que $E_2(0) = 0$ et $n = 0$ (bandes plates) pour:

$$V_g = V_{th} = V_t + E_F / e.$$

La tension V_{th} est la **tension de seuil** du transistor.



TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Etape 2: Relation $n(E_F)$ dans GaAs

Dans la couche d'inversion de l'hétérojonction, les électrons sont confinés, dans GaAs, dans un puits de potentiel très étroit (quelques nm).

Donc, le calcul classique de la distribution de ces porteurs libres en termes de structure de bandes et densités d'états tridimensionnelles est en défaut.

Le calcul quantique montre que la densité superficielle totale d'électrons dans la couche d'inversion s'écrit:

$$n = \frac{m_e}{\pi \hbar^2} kT \sum_i \text{Ln} \left(1 + e^{(E_F - E_i)/kT} \right)$$

N.B.: En pratique, seulement les deux premières sous-bandes ($i=0$ et 1) sont peuplées.



TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Etape 3: Relation $n(V_g)$

En limitant la population électronique de la couche d'inversion aux deux premières sous-bandes, les équations précédentes permettent d'obtenir le système ci-dessous qui n'a pas de solution analytique.

Il nécessite une
résolution
auto-cohérente.

On traitera les 2
cas suivants:

$$n = \frac{\epsilon_2}{ed} \left(V_g - \frac{E_F}{e} - V_t \right)$$
$$n = \frac{m_e}{\pi \hbar^2} kT \operatorname{Ln} \left((1 + e^{(E_F - E_o)/kT}) (1 + e^{(E_F - E_1)/kT}) \right)$$

$$V_t = \frac{E_b}{e} - \frac{\Delta E_c}{e} - \frac{e N_d}{2 \epsilon_2} d_d^2$$
$$E_o = \gamma_o n^{2/3} \quad E_1 = \gamma_1 n^{2/3}$$
$$\gamma_o = \left(\frac{\hbar^2}{2m_e} \right)^{1/3} \left(\frac{9}{16} \frac{\pi e^2}{\epsilon_1} \right)^{2/3}$$
$$\gamma_1 = \left(\frac{\hbar^2}{2m_e} \right)^{1/3} \left(\frac{21}{16} \frac{\pi e^2}{\epsilon_1} \right)^{2/3}$$



TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Cas 1: Régime de faible inversion

En régime de faible inversion, le **niveau de Fermi** étant situé **au-dessous** de la première **sous-bande E_0** et le taux d'occupation des sous-bandes **est faible**.

Dans ce cas, **la densité d'électrons** est reliée à la **tension de grille** par la loi exponentielle suivante:

$$n = 2 \frac{m_e}{\pi \hbar^2} kT e^{e(V_g - V_t)/kT}$$

N.B.: Il faut noter qu'en **régime de faible inversion**, le puits de potentiel est à la fois **peu profond** et **large**, il en résulte que la **quantification** des états électroniques est **faible**.

Le **gaz d'électrons** présente alors un caractère **plus tridimensionnel** que **bidimensionnel**. La **résolution classique** du problème est **mieux adaptée** dans ce cas (MOS classique).



TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Cas 2: Régime de forte inversion

Lorsque la population électronique devient suffisamment importante, le niveau de Fermi passe au-dessus du bas de la deuxième sous-bande E_1 .

Dans ce cas, la densité d'électrons suit une loi sensiblement linéaire donnée par:

$$n = \beta(V_g - V_t)$$

Avec:

$$\beta = \frac{2\varepsilon_2 e m_e}{2de^2 m_e + \varepsilon_2 \pi \hbar^2}$$

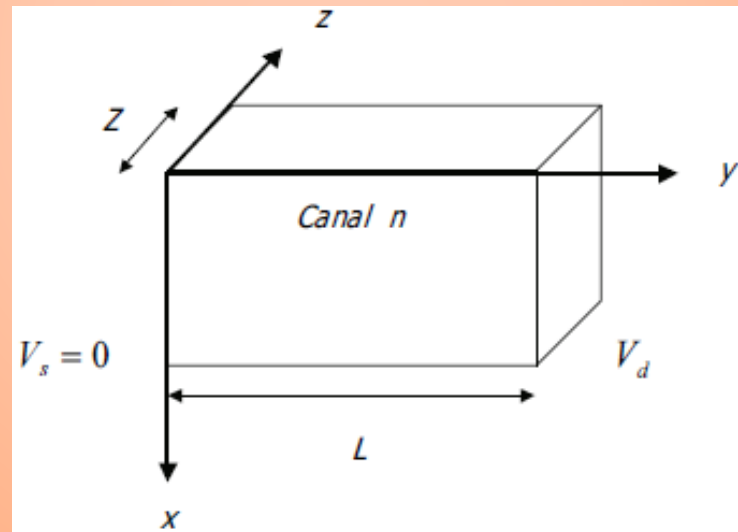
$$V_t = \frac{E_b}{e} - \frac{\Delta E_c}{e} - \frac{eN_d}{2\varepsilon_2} d_d^2$$



TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Polarisation du drain

Lorsque le drain du transistor est polarisé par une tension drain-source V_d , la polarisation de la structure est distribuée longitudinalement de $V = 0$ côté source à $V = V_d$ côté drain.



TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Polarisation du drain (suite)

Cas1: V_d faible

Lorsque V_d est faible, la mobilité des porteurs peut être considérée constante le long du canal, et on obtient:

$$I_d = \frac{Ze\mu\beta}{L} \left((V_g - V_t)V_d - V_d^2/2 \right)$$

Z: Largeur du canal;

L: Longueur du canal,

μ : mobilité des porteurs

$$\beta = \frac{2\varepsilon_2 e m_e}{2de^2 m_e + \varepsilon_2 \pi \hbar^2}$$

$$V_t = \frac{E_b}{e} - \frac{\Delta E_c}{e} - \frac{eN_d}{2\varepsilon_2} d_d^2$$



TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Polarisation du drain (suite)

Cas2: V_d importante

Lorsque V_d est importante, la mobilité des porteurs diminue et la vitesse de ces derniers atteint une valeur de saturation v_s pour $V_d = V_{dsat}$. On obtient:

$$I_d = Z e \beta (V_g - V_t - V_d) \left(\mu \frac{dV}{dy} \right)_{y=L}$$

Quand $V_d = V_{dsat}$, on obtient:

$$I_{dsat} = Z e \beta (V_g - V_t - V_{dsat}) v_s \quad \text{ou} \quad I_{dsat} = \frac{Z e \beta v_s}{L E_s} \left((V_g - V_t) V_{dsat} - V_{dsat}^2 / 2 \right)$$

Ce qui donne:

$$V_{dsat} = V_g - V_t + V_s - \left((V_g - V_t)^2 + V_s^2 \right)^{1/2} \quad \Rightarrow \quad I_{dsat} = g_o \left((V_g - V_t)^2 + V_s^2 \right)^{1/2} - V_s$$

$$g_o = Z e \beta v_s \quad \text{dimensions d'une conductance}$$



TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Polarisation du drain (suite)

Cas2: V_d importante (suite)

a) Cas du canal long

Dans un transistor à canal long, $V_s = L E_s$, est très importante de sorte que les expressions précédente se simplifient en:

$$V_{dsat} \approx V_g - V_t$$

$$I_{dsat} \approx g_o (V_g - V_t)^2 / 2V_s$$

En régime
de saturation

$$g_m = g_o \frac{V_g - V_t}{((V_g - V_t)^2 + V_s^2)^{1/2}}$$

b) Cas du canal court

Dans un transistor à canal court, V_s est très inférieur à $V_t - V_g$ et on obtient:

$$V_{dsat} \approx V_s$$

$$I_{dsat} \approx g_o (V_g - V_t)$$

$$g_{mmax} \approx g_o$$

$$g_o = Z e \beta v_s$$

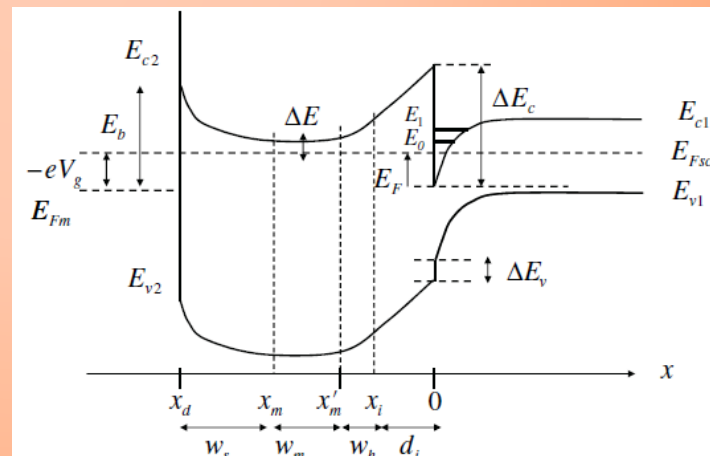
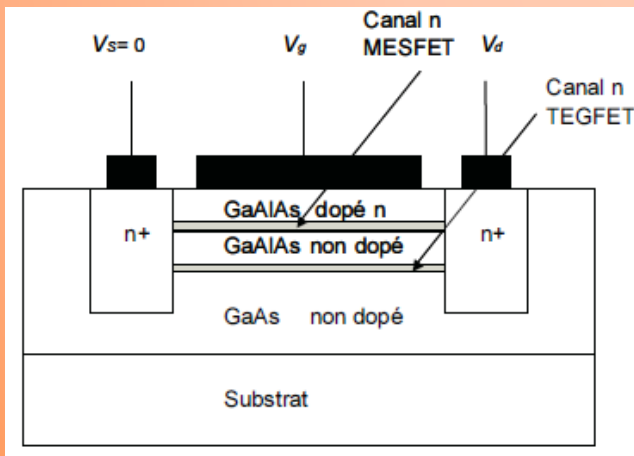


TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Effet du MESFET parasite

Dans les paragraphes précédents, nous avons supposé que les zones de déplétion de la diode Schottky métal-AlGaAs et de l'hétérojonction AlGaAs-GaAs se recouvrent, le AlGaAs est donc en déplétion totale.

Lorsque V_g atteint et dépasse une valeur de seuil V_m , les deux zones de charge d'espace ne se recouvrent plus et un canal conducteur de largeur W_m (de section $Z.W_m$) peuplé d'une densité N_d d'électrons, apparaît dans AlGaAs.



TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

W_m : largeur du canal conducteur

W_s : Largeur de la zone de déplétion de la diode Schottky

W_h : Largeur de la zone de déplétion de l'hétérojonction

d_i : l'épaisseur de la région intrinsèque,

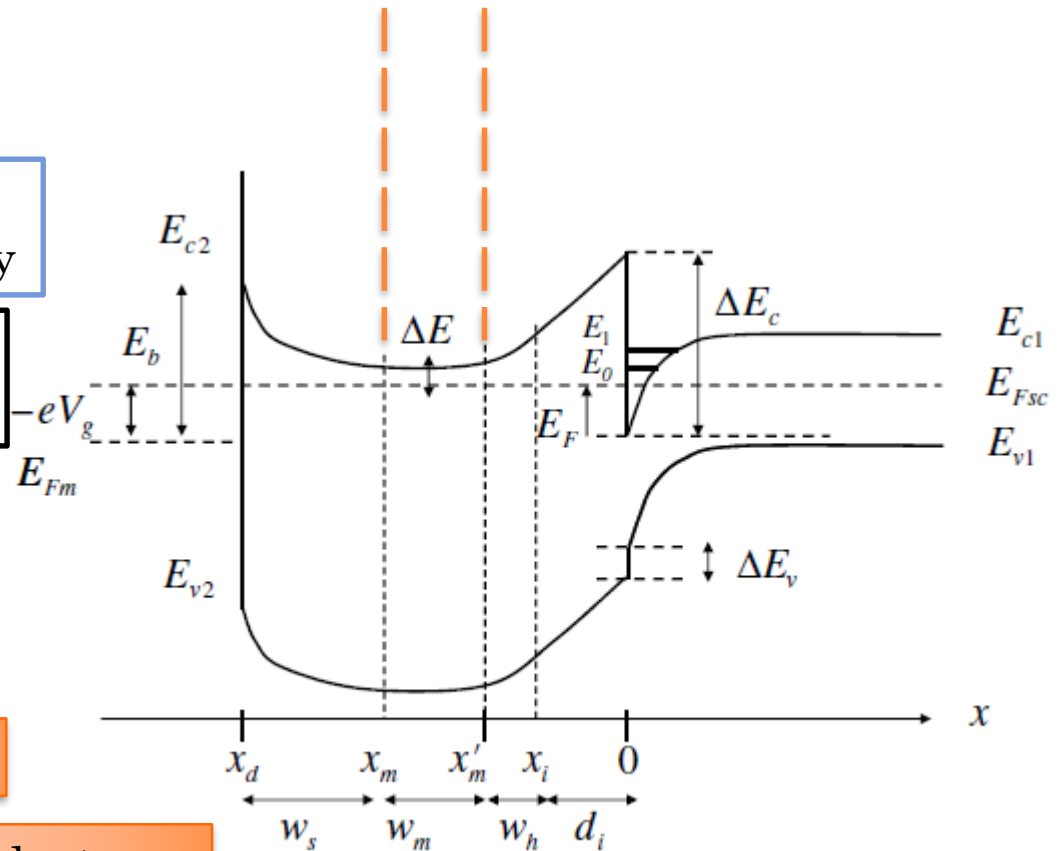
d_d : épaisseur de AlGaAs dopé

X_d : Abscisse de la région dopée

X_m : Abscisse début du canal conducteur

X'_m : Abscisse fin du canal conducteur

X_i : Abscisse de la région intrinsèque



TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Paramètres du TEGFET en présence du MESFET parasite

La largeur W_s de la zone de déplétion de la diode Schottky est donnée par:

$$w_s = \left(\frac{2\varepsilon_2}{eN_d} \left(\frac{E_b}{e} - V_g - \frac{\Delta E}{e} \right) \right)^{1/2} \quad \text{avec} \quad \Delta E = kT \ln \frac{N_c}{N_d} \quad w_s = \left(\frac{2\varepsilon_2}{eN_d} \left(\frac{E_b}{e} - V_g - \frac{kT}{e} \ln \frac{N_c}{N_d} \right) \right)^{1/2}$$

La largeur W_h de la zone de déplétion de l'hétérojonction:

$$w_h = n/N_d$$

La largeur W_m du canal du transistor MESFET s'écrit donc:

$$w_m = d - d_i - w_h - w_s$$

$$w_m = d - d_i - \frac{n}{N_d} - \left(\frac{2\varepsilon_2}{eN_d} \left(\frac{E_b}{e} - V_g - \frac{kT}{e} \ln \frac{N_c}{N_d} \right) \right)^{1/2}$$



TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Paramètres du TEGFET en présence du MESFET parasite (suite)

La tension de seuil V_m à partir de laquelle l'effet parasite du transistor MESFET se manifeste est la tension V_g pour laquelle $w_m = 0$:

$$V_m = \frac{E_b}{e} - \frac{kT}{e} \ln \frac{N_c}{N_d} - \frac{eN_d}{2\epsilon_2} \left(d - d_i - \frac{n_m}{N_d} \right)^2$$

La densité d'électrons dans la couche d'inversion de GaAs est alors égale à n_m est donnée par: $n_m = \beta(V_m - V_t)$ ce qui donne:

$$V_m = \frac{E_b}{e} - \frac{kT}{e} \ln \frac{N_c}{N_d} - \frac{eN_d}{2\epsilon_2} \left(d - d_i - \frac{\beta}{N_d} (V_m - V_t) \right)^2$$

$$V_m = V_1 - (V_1^2 - V_2^2)^{1/2}$$

$$V_1 = V_t + \frac{(d - d_i)N_d}{\beta} - \frac{\epsilon_2 N_d}{e\beta^2}$$

$$V_2 = \left(\left(V_t + \frac{(d - d_i)N_d}{\beta} \right)^2 - \left(\frac{E_b}{e} - \frac{kT}{e} \ln \frac{N_c}{N_d} \right) \frac{2\epsilon_2 N_d}{e\beta^2} \right)^{1/2}$$



TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP À GAZ D'ÉLECTRONS BIDIMENSIONNEL-TEGFET

Principaux avantages

- Faible bruit;
- Grande mobilité.
- Performance à haute fréquence

Applications

- Amplificateurs à faible bruit
- Installé dans le télescope radio
- Applications spatiales et militaires
- Téléphone portable

